

## MARIA CARMEN PAGES BERTRAN

### Los modelos energéticos: un intento de afrontar la crisis energética. Análisis del sistema energético español\*

---

#### I. INTRODUCCION

La necesidad de una mejor comprensión de las interrelaciones entre las diferentes actividades energéticas de producción y el consumo de energía, junto con el análisis de la estructura energética de una economía en relación con su entorno político, económico y social, han constituido los motivos básicos que explican la elaboración y formulación de un número importante de modelos energéticos durante los últimos años.

Dichos modelos cubren una amplia gama de objetivos a estudiar, al mismo tiempo que utilizan técnicas tan diversas como la econometría, la simulación y la programación. Sin embargo, los fundamentos económicos y la función que estos modelos deben cumplir son prácticamente los mismos en todos ellos. En efecto, un modelo no es más que un instrumento; es decir, una representación más o menos manejable de la realidad, construida a partir de un cuerpo de hipótesis bien definidas y procurando que los resultados tengan significación en relación con dichas hipótesis y con los datos y parámetros utilizados. Así pues, el va-

\* Estudio realizado con una beca de investigación del Banco de España, y llevado a cabo en el Brookhaven National Laboratory (Nueva York), centro de investigación del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

lor de los resultados obtenidos mediante la utilización de un modelo provienen exclusivamente de la coherencia y confrontación de las hipótesis adoptadas a la realidad a estudiar. Es concretamente al nivel de utilización de dichos resultados donde se presentan las mayores divergencias.

Sin embargo, y aceptando precisamente el carácter instrumental de los modelos en general, y de los energéticos en particular, éstos se muestran como instrumentos analíticos de gran valor para ayudar a tener un mejor conocimiento del sistema energético de un país.

El Brookhaven National Laboratory, en su intento de ofrecer respuestas a los problemas energéticos con que se ven enfrentados la mayoría de países del mundo, ha desarrollado una serie de modelos energéticos que han resultado instrumentos valiosos para el análisis de los sistemas energéticos. Dado el interés que ofrece esta serie de modelos del B.N.L., la primera parte de este estudio constituye un análisis de sus aspectos más importantes, centrándose en especial, en aquellos modelos que por sus innovaciones matemáticas o por su mejor aproximación a la realidad se han considerado más relevantes.

La segunda parte de este trabajo, que será el objeto de otro artículo de esta revista, es la aplicación de uno de estos modelos, el Time-Stepped Energy System Model (TESOM), para el caso concreto español. Se ha desarrollado un escenario de referencia y tres casos alternativos con el fin de realizar un análisis sensitivo del sistema energético español. En concreto, se ha intentado evaluar qué sector de la economía española: industrial, residencia/comercial y transportes, ofrece unas respuestas mayores a la instrumentación de políticas energéticas, respectivamente en cada uno de los sectores mencionados, tendentes a incrementar los rendimientos con que la energía es usada.

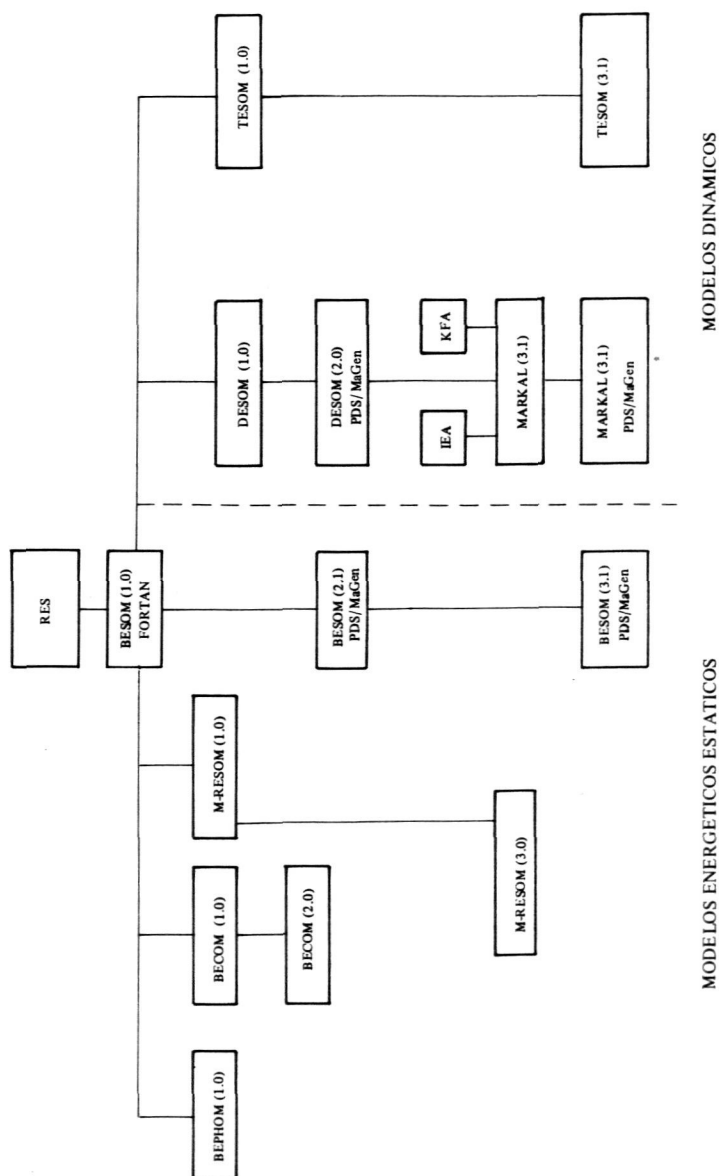
## II. REVISION DE LOS MODELOS ENERGETICOS UTILIZADOS EN EL BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

En este apartado se ha llevado a cabo un estudio comprensivo de los principales modelos energéticos desarrollados en el Brookhaven National Laboratory. En la figura 1 están representados los modelos que se han considerado.

La cronología en el desarrollo y formulación de estos instrumentos de análisis refleja claramente el esfuerzo creciente realizado para alcan-

FIGURA 1

*Relación entre BESOM y sus variantes*



zar un mejor conocimiento del sistema energético de un país. La complejidad e importancia que los problemas energéticos han ido adquiriendo durante la última década, se ha reflejado miméticamente en cada nueva versión, mejorada y/o ampliada de estos modelos energéticos.

Cada modelo en particular es respecto a su inmediato predecesor fruto de la necesidad de dar respuestas a problemas energéticos más específicos, localizados ya a nivel concreto de un sector determinado o a nivel global de un sistema económico.

En esta revisión se ha analizado en primer lugar el Reference Energy System (RES). A pesar de que el RES no debería ser considerado como un modelo matemático, puesto que ninguna variable es determinada endógenamente, sino más bien como un sistema de contabilidad energética, se le ha incluido en este estudio básicamente por dos motivos. En primer lugar por representar cuantitativamente la estructura global del sistema energético de un país; y en segundo lugar por constituir el esqueleto sobre el cual se han estructurado las ecuaciones matemáticas que configuran los demás modelos. Por consiguiente un conocimiento básico del RES es un paso imprescindible para avanzar en el estudio del resto de esta serie de modelos.

El siguiente eslabón lo constituye el Brookhaven Energy System Optimization Model (BESOM). Debido a que este es el primer modelo que puede ser considerado como tal, se ha hecho especial hincapié en el estudio del mismo. Las versiones que posteriormente se realizaron dentro de la categoría de modelos energéticos estáticos (Regional Process Heat Model, Brookhaven Building Energy Conservation Optimization Model y Multi-Regional Energy System Optimization Model), se han analizado sólo en sus aspectos diferenciadores. No es este el caso de los modelos dinámicos, en especial del Brookhaven Time-Stepped Energy System Optimization Model y del Market Allocation Model, los cuales han sido estudiados en profundidad.

Es un hecho indiscutible la importancia que el TESOM y MARKAL tienen como instrumentos analíticos, tanto para el estudio de sistemas energéticos como para la definición de políticas energéticas. Una muestra de ello es la aplicación que estos dos modelos han tenido en distintos y variados países. Por ello la última parte de este apartado es un análisis comparativo de ambos modelos.

No se ha tenido en cuenta las diversas versiones de un mismo modelo, debido a que se diferencian tan sólo en el lenguaje de ordenador utilizado.

### *1. Reference Energy System*

El Reference Energy System (RES) es un formato especializado



para representar detalladamente la estructura tecnológica de un sistema energético, así como el consumo de energía primaria y las emisiones al medio-ambiente. Conceptualmente, el RES es una representación de la red de flujos energéticos que van desde la extracción de recursos e importación de energía primaria, a través de los procesos intermedios de conversión, hasta la satisfacción de las necesidades finales de servicios energéticos. El RES es un sistema completo y termodinámicamente consistente de contabilidad, en unidades físicas, de los flujos energéticos a través de los procesos y aparatos de conversión de la energía. Usando eficiencias de conversión apropiadas, el RES avanza desde la extracción e importación de fuentes de energía primaria, hasta el consumo de los combustibles en los correspondientes aparatos de uso final que satisfacen demandas concretas de servicios energéticos.

Dentro del RES, el énfasis está localizado en la estructura tecnológica que relaciona los flujos energéticos que entran en el sistema (crudo, gas natural, carbón, uranio, solar, etc.) con los servicios energéticos funcionales, no-sustituibles que constituyen el producto final de dicho flujo (energía mecánica, calor industrial, iluminación, etc.).

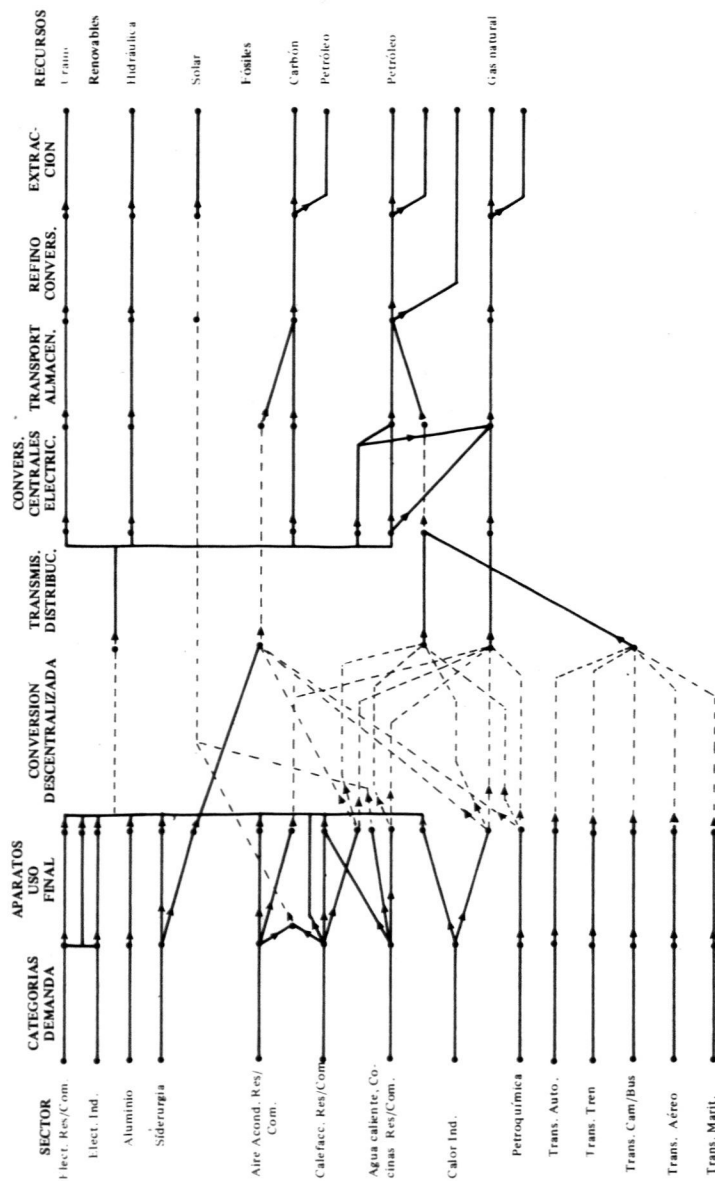
Un ejemplo de este diagrama de flujos está representado en la figura 2; las diferentes energías primarias se encuentran en la parte derecha del diagrama, estando las categorías de demanda útil en su parte izquierda. En la parte superior de la figura vienen dadas las diversas actividades necesarias para convertir la energía primaria en los diferentes combustibles requeridos para satisfacer las demandas de energía de un país. Los sectores de demanda que se consideran en el RES dependen básicamente de la cualidad y desagregación de los datos disponibles.

## 2. *Brookhaven Energy System Optimization Model (BESOM)*

El BESOM es un modelo de programación lineal, conducido desde la demanda y estructurado a partir del Reference Energy System. Se desarrolló para evaluar cuantitativamente, dentro de una estructura de sistemas, las tecnologías y políticas nacionales. El modelo fue diseñado para examinar la intersustitución de combustibles en un contexto sujeto a restricciones en la disponibilidad de recursos y tecnologías competitivas.

BESOM es un modelo estático que ofrece una "copia" de la configuración del sistema energético para un año concreto; aunque también puede ser usado de forma secuencial para analizar un periodo de tiempo. La estructura del modelo es particularmente apropiada para la valoración de tecnologías energéticas y para el análisis de políticas, dado que enfatiza los factores tecnológicos, económicos y ambientales. Al

FIGURA 2  
*Reference Energy System (Ilustrativo)*



ser un modelo de programación lineal el BESOM puede ser usado para investigar escenarios alternativos, minimizando la función objetivo para variables tales como: el coste total del sistema, importaciones de petróleo, necesidades de capital, efectos medio-ambientales y uso de recursos renovables.

BESOM se centra en la caracterización técnica, económica y ambiental de los procesos de conversión, entrega y utilización que configuran el conjunto del sistema energético.

BESOM puede ser usado como un modelo de optimización o como instrumento de simulación. Cuando se usa como modelo de optimización, BESOM calcula la configuración óptima de oferta-demanda del sistema energético, sujeto a restricciones exógenas especificadas. Estas restricciones normalmente incluyen límites en la disponibilidad de diferentes recursos, en la penetración de mercado de nuevas tecnologías y en las capacidades de generación de electricidad.

Sin embargo, se puede también utilizar el modelo como instrumento de simulación para analizar el coste total de un sistema energético concreto, o los impactos ambientales del mismo. Para ello se restringe el modelo de tal forma que duplique el sistema de oferta-demanda deseado, obteniéndose entonces la información solicitada. Como instrumento de simulación, el BESOM también puede ser usado para establecer una relación de futuras tecnologías, de oferta o de demanda, siguiendo un criterio de más a menos atractivas. Para ello se fuerzan pequeñas cantidades de dichas tecnologías a entrar en el sistema, analizándose seguidamente los valores marginales obtenidos conjuntamente con los precios asumidos. Este ejercicio tiene como resultado el generar un orden jerarquizado de tecnologías, de acuerdo con un criterio preestablecido, conjuntamente con unos ratios coste-beneficio.

En resumen algunas de las más importantes características del modelo son:

1) El modelo tiene una estructura tecnológica global que incluye todos los recursos energéticos alternativos, y las demandas energéticas, tanto eléctricas como no eléctricas.

2) El modelo refleja la gama completa de posibilidades de sustitución de combustibles.

3) Se incorporan las características técnicas, económicas y ambientales de los mecanismos de conversión, tanto de oferta como de demanda.

4) Se incluyen las características de la curva de carga de la demanda eléctrica.

5) Se puede utilizar el modelo tanto a nivel de planificación energética regional, como a nivel nacional.

La información input que requiere el modelo se puede englobar en siete categorías: 1) eficiencias de oferta y demanda, 2) costes, 3) factores de impacto ambiental, 4) recursos disponibles, 5) demandas de energía útil, 6) penetración de mercado estimadas, y 7) características de la curva de carga de todas las demandas de servicios eléctricas.

### *Eficiencias*

Las eficiencias de oferta, que relacionan las formas de energía intermedias con los recursos primarios, incluyen eficiencias de: refino, conversión eléctrica, transmisión y distribución de electricidad, distribución de calor, y producción de combustibles sintéticos. Una eficiencia de refino es un valor combinado de las eficiencias de extracción, limpieza y transporte de energías primarias; y está definida como la relación entre el contenido energético del combustible entregado al usuario y el contenido energético de la energía primaria a boca de mina o pozo. Además de estas eficiencias de oferta, también se especifican eficiencias de conversión para cada uno de los aparatos de uso final.

### *Costes*

Los costes considerados en el BESOM incluyen: costes de capital, costes de operación y mantenimiento, costes de transmisión y distribución, costes de recursos y costes de aparatos de uso final. Los costes de recuperación del capital están asociados con cada inversión efectuada. Se especifica también un factor máximo de utilización de las centrales eléctricas, siendo el factor de capacidad real determinado por el modelo, y estando éste último relacionado con el factor de carga de las demandas eléctricas satisfechas por cada una de las tecnologías generadoras de electricidad.

### *Medio ambiente*

Los impactos ambientales están asociados con cada uno de los procesos en las diferentes trayectorias de los combustibles desde la energía primaria hasta el uso final. El impacto total de cada una de las actividades es calculado y sumado a través de cada una de las trayectorias. Algunos de los índices ambientales incluidos en el modelo son: niveles

de CO, CO<sub>2</sub>, NOX, SO<sub>2</sub>, partículas e hidrocarburos. El modelo calcula también los curies de radioactividad y la contaminación térmica de las centrales eléctricas.

### *Restricciones*

Existen seis principales categorías de ecuaciones restrictivas en el BESOM.

1) Ecuaciones de conservación energética de los procesos, que equilibran el contenido energético de los combustibles que entran en un proceso, con el contenido de los combustibles que salen del mismo, más las pérdidas energéticas.

2) Ecuaciones de oferta, que limitan las cantidades de un recurso dado en términos del contenido energético del combustible primario. Para los combustibles sintéticos y las centrales de bombeo, las ecuaciones restrictivas de oferta representan el contenido energético de los combustibles sintéticos después de manufacturados.

3) Ecuaciones de demanda, que especifican el nivel de demanda de energía útil, definida ésta según un criterio de funcionalidad, en otras palabras, se entiende por demanda de energía útil aquella cantidad de energía necesaria para mantener una actividad social o económica (ej. calor para calefacción residencial), asumiendo que la energía pudiese ser usada al 100% de eficiencia técnica. La demanda de energía útil viene especificada por niveles o por tasas de crecimiento para cada una de las categorías de demanda.

4) Ecuaciones de producción eléctrica y de caracterización de la curva de carga, que limitan la capacidad instalada de cada uno de los tipos de centrales eléctricas, teniendo en cuenta los picos de demanda eléctrica. Las ecuaciones de caracterización de la curva de carga relacionan el tipo y capacidad eléctrica instalada con las características de la curva de carga de cada una de las demandas eléctricas, según estación del año y tiempo del día.

5) Ecuaciones ambientales, que limitan las emisiones de partículas a la atmósfera. Sin embargo, en la mayoría de aplicaciones del modelo estas ecuaciones no son restrictivas y se utilizan tan sólo para sumar los efectos ambientales.

6) Ecuaciones de penetración de mercado, que limitan la penetración en el mercado de nuevas tecnologías; estas limitaciones están

relacionadas a un uso máximo o mínimo de combustible o a una capacidad instalada máxima o mínima permitida, según cada tipo de tecnología.

### *Función objetivo*

Diferentes funciones objetivo pueden ser usadas en el modelo BESOM. Normalmente, se ha minimizado el coste total del sistema, sin embargo otras funciones objetivo posibles de utilización son:

- \* Coste no anualizado, sin considerar los costes de los aparatos de uso final.
- \* Costes anualizados del sistema, sin aparatos de uso final.
- \* Consumo total de crudo, gas natural y gas sintético.
- \* Consumo total de recursos domésticos.
- \* Consumo total de recursos no renovables.
- \* Consumo total de recursos renovables.
- \* Indices ambientales.

### *Output BESOM*

De la ejecución del modelo BESOM, para un año determinado, se puede obtener la siguiente información sobre el sistema energético examinado:

- 1) Niveles de actividad de las formas intermedias de energía, asociadas con las trayectorias del RES.
- 2) Consumo total para cada tipo de energía primaria.
- 3) Los factores de capacidad y de carga óptimos para cada uno.
- 4) Efectos ambientales, que vienen expresados en diferentes unidades de medida, tales como toneladas, curies, etc.
- 5) Precios sombra, o valores marginales de las variables y de las restricciones. Para las variables no activas, la reducción necesaria de coste para que dicha variable entre en el sistema.
- 6) Los costes totales del sistema energético asociados a una estructura óptima de los sistemas de oferta-demanda. Además, los valores de los objetivos alternativos obtenidos con esta solución.

### 3. *Regional Process Heat Model (BEPHOM)*

Esta variante del BESOM se realizó para poder llevar a cabo análisis más realistas del uso de energía solar y geotérmica en el sector de demanda de calor industrial. En el BEPHOM se han representado diferentes caracterizaciones climáticas, correspondiendo a diversas regiones, junto con detallada modelización de toda la gama de tecnologías solares de aplicación industrial. También se ha tenido muy presente la necesidad de sistemas auxiliares para todos los usos de energía solar. Este modelo en realidad es acoplado al BESOM sustituyendo la categoría de demanda de energía útil, calor industrial, por la más compleja y detallada representación del BEPHOM.

### 4. *Brookhaven Building Energy Conservation Optimization Model (BECOM)*

Es este un modelo de programación lineal que representa el uso de energía en el sector residencial y comercial. Al igual que el modelo anterior, también el BECOM puede ser acoplado al BESOM, para sustituir las categorías de demanda del sector residencial y comercial por un modelo de optimización específico de este sector. BECOM recoge los datos necesarios para caracterizar nueve tipos diferentes de edificios en cuatro regiones distintas. El modelo obtiene la solución óptima no sólo teniendo en cuenta diversas alternativas de aparatos de uso final, con diferentes costes de capital y eficiencias asociados y usando diversos combustibles, sino también considerando cuatro grados distintos de retrofit, que pueden ser superpuestos a cada uno de los nueve tipos de edificios. El objetivo del modelo es evaluar los impactos que la instrumentación de políticas de conservación pueden tener en el consumo total de energía en el sector residencial-comercial.

### 5. *Multi-Regional Energy System Optimization Model (M-RESOM)*

La principal razón al desarrollar este modelo fue reducir el excesivo nivel de agregación considerado en el BESOM. No existen diferencias en la estructura matemática del BESOM y el M-RESOM, sino en las dimensiones geográficas que ambos modelos abarcan. Mientras el BESOM considera el país a analizar de forma homogénea y única, el M-RESOM divide el mismo espacio geográfico en nueve regiones distintas, considerando las características particulares de cada una de ellas.

## 6. *Dynamic Energy System Optimization Model (DESOM)*

DESOM, predecesor del modelo MARKAL, fue el primer intento dentro de esta estructura de modelos de Brookhaven National Laboratory, de desarrollar un modelo de programación lineal dinámico. El aspecto dinámico de este modelo se basa fundamentalmente en que en lugar de obtener la solución óptima para un año dado y sin consideraciones pasadas o futuras como hace el BESOM, el DESOM calcula dicha solución óptima para el período global de tiempo, teniendo en cuenta el desarrollo en el tiempo de todas las variables consideradas en el modelo. Una versión más refinada y mejorada del DESOM, pero con el mismo fundamento teórico, la constituye el modelo MARKAL de la Agencia Internacional de la Energía.

## 7. *Brookhaven Time-Stepped Energy System Optimization Model (TESOM)*

El Brookhaven Time-Stepped Energy System Optimization Model (TESOM) es un modelo energético, a nivel nacional, que refleja inseguridad en los procesos de planificación energética, dado que supone una previsión imperfecta respecto a futuros recursos de energía primaria, de demandas, precios y disponibilidades tecnológicas. TESOM fue concebido y desarrollado para ser: a) un sistema mejorado y automático de optimización y simulación y b) un instrumento alternativo al modelo MARKAL para asistir en el estudio de la evolución de los sistemas de oferta-demanda nacionales.

TESOM puede ser clasificado como un modelo de “tendencia actual” en una secuencia temporal, en el cual los niveles óptimos de las variables decisionales para un período concreto, vienen determinados enteramente por:

- a) los niveles óptimos de dichas variables decisionales en períodos anteriores;
- b) los supuestos sobre tasas de retiro y deteriorización del stock de capital, del promedio de vida técnica del mismo y de sus costes asociados; y
- c) los factores económicos y tecnológicos que afectan los niveles posibles de las variables decisionales durante el “presente” período de estudio, (ej. tasas de deteriorización, elasticidades de oferta, disponibilidades acumuladas de recursos, consideraciones de penetración de mercado, etc.).

El modelo TESOM se ejecuta normalmente de forma secuencial



con períodos de cinco años. Sin embargo, la duración de los intervalos es un dato que proporciona el usuario. Para cada año el modelo elige la mejor asignación de recursos energéticos y selecciona la óptima configuración de tecnologías de oferta, conversión y demanda, de acuerdo al criterio de minimización de costes, que satisface una demanda de servicios dada. La oferta de recursos energéticos está representada específicamente con curvas a largo y corto plazo, o a través de precios fijos, así como las disponibilidades de recursos por año.

Matemáticamente, TESOM es un modelo de programación lineal a partir del RES, formulado como una secuencia expansiva de cada uno de los períodos de tiempo. Para un período de tiempo dado, las soluciones obtenidas en períodos previos son incorporadas en la formulación secuencial, así como los datos relativos al stock de capital existente, como pueden ser: tasas de deteriorización, vida media, eficiencias de conversión dependientes de la variable tiempo, factores de disponibilidad, costes de operación y mantenimiento y cargas financieras sobre el capital. A partir de los datos anteriores y siguiendo un criterio de minimización de costes, o cualquier otro objetivo cuantificable, la demanda de energía es satisfecha de acuerdo con la expansión de la oferta, la penetración creciente máxima de la misma para el año dado y de las disponibilidades netas desde la evolución del sistema energético hasta la fecha. En la satisfacción de futuras demandas energéticas, el TESOM tiene una memoria de las disponibilidades netas del pasado, aumentadas por las nuevas incorporaciones en el próximo futuro. La puesta al día y los procedimientos secuenciales son repetidos hasta que se alcanzan soluciones para todo el horizonte de tiempo.

TESOM ofrece una representación detallada del sector eléctrico. Se definen una serie de demandas tipo (ej. carga base, carga intermedia, etc.). Cada una de las demandas tipo tiene su propia serie de características de acuerdo a su comportamiento estocástico y a su carga estacional (invierno, verano, primavera, otoño) y diaria (día, noche). La capacidad requerida por el sistema viene regida por el máximo pico de demanda ocurrido cualquier momento del día y año. Cargando apropiadamente las demandas de servicios eléctricos en las diversas demandas tipo, y subsecuentemente cargando dichas demandas en las diversas combinaciones estacionales —diarias, se determina la altura total del pico estacional-diario, añadiéndole las pérdidas por transmisión y distribuciones más los márgenes de reserva. Esta detallada modelación del sector eléctrico permite la introducción de consideraciones sobre administración de la curva de cargas en la formulación del problema. Además este enfoque del sector eléctrico, hace que la duración de la curva de carga esté, en parte, exógenamente determinada a partir de detalladas características de la demanda y de sus implicaciones para el sistema

eléctrico.

TESOM contiene también algunas características diseñadas para suavizar las transiciones intertemporales generadas por las soluciones secuenciales. Entre ellas están los mecanismos para determinar el coste del stock de capital y los procesos de ajuste en las disponibilidades del mismo, a través de un nuevo algoritmo de penetración de mercado, el cual evita el "todo o nada" característico de los modelos de programación lineal. Este mecanismo consiste básicamente en que mientras una tecnología opera dentro de su vida técnica, los costes anualizados de capital suponen un coste para el sistema. En otras palabras, los costes fijos asociados con inversiones previas son contabilizados, sin tener en cuenta el que sea óptimo para el sistema hacer funcionar, parcial o completamente, una tecnología vieja. Retiros prematuros de stocks de capital relativamente ineficientes se ven desaconsejados cuando los costes variables asociados a stocks de capital alternativo son combinados con el hecho de que inmediatas "depreciaciones" son impedidas.

El algoritmo de penetración de mercado requiere, como input, niveles optimísticos de penetración para cada una de las tecnologías en cada uno de los años. Dicho algoritmo incorpora los valores marginales de períodos previos, la tasa de implementación en años posteriores y un retraso temporal. También se tienen en cuenta las características técnicas y de mercado del período presente para determinar de forma más realista los niveles de actividad para las nuevas tecnologías. Las restricciones especificadas por el usuario son ajustadas endógenamente de tal forma que se tienen en cuenta las penetraciones previas de dicha tecnología y su competitividad.

TESOM también puede ser usado como instrumento de simulación y para analizar posibles efectos distorsionadores debido a evoluciones imprevistas de los precios de las energías primarias. En esta última faceta se puede suponer que las tasas de crecimiento actuales en las extracciones e importaciones de energías primarias y los precios de las mismas continúan en el futuro. De esta forma los efectos de acciones desequilibradoras pueden ser analizados a lo largo del horizonte temporal estudiado, confrontándolos con la tendencia seguida utilizando la capacidad simuladora automática del modelo.

## 8. *Market Allocation Model (MARKAL)*

MARKAL fue desarrollado a través de un esfuerzo coordinado entre la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos, para facilitar el estudio de: a) las posibilidades de nuevas tecnologías en la satisfacción de futuras deman-

das de servicios energéticos; b) determinar la relativa competitividad de nuevas tecnologías, con lo cual poder asignar recursos escasos en programas de Investigación y Desarrollo.

El desarrollo del modelo MARKAL fue motivado por la necesidad de los países miembros de la A.I.E. de determinar la política energética y las opciones estratégicas a seguir, para poderse enfrentar a un futuro incierto sobre los recursos de energía primaria, las demandas energéticas, los costes y las disponibilidades de nuevas tecnologías.

MARKAL es un modelo de programación lineal, conducido desde la demanda y utilizado de forma individual para cada uno de los países participantes en el proyecto. Fue diseñado para analizar la evolución de los sistemas de oferta y distribución de la energía, dentro de un período de tiempo dado. MARKAL, al igual que TESOM está basado en el RES. Pero diferenciándose de éste en que todos los datos de disponibilidades de oferta, niveles de demanda y futuras tecnologías se suponen conocidos para todo el horizonte de tiempo estudiado.

MARKAL ha sido fruto de un intenso esfuerzo de cooperación internacional dentro de la A.I.E., desarrollado entre el National Center for Analysis of Energy System, en B.N.L. y el Kernforschungsanlage en Julich, Alemania. El modelo MARKAL se estructuró a partir del DESOM y un modelo de KFA, incorporándole nuevos refinamientos modelísticos. En concreto, MARKAL combina la flexibilidad en el lado de la demanda y potenciales sustituciones de combustible del DESOM, con flexibilidad en el lado de la oferta y detallados procesos energéticos del modelo de KFA.

MARKAL puede caracterizarse como un modelo dinámico de optimización del sistema energético, dependiente de la variable tiempo. Las actividades de cada período están conectadas con las del pasado y las futuras a través de unas restricciones explícitas de capacidad y crecimiento. La estructura matemática que en concreto se usa, asegura que toda la información relativa al pasado, presente y futuro se utiliza simultáneamente para optimizar la función objetivo seleccionada. En este sentido MARKAL se puede calificar como de "clarividente", mientras que el modelo TESOM se podría definir como un modelo de "expectativas racionales".

Dados los inputs y las restricciones, MARKAL selecciona la trayectoria óptima a seguir sobre todo el horizonte de tiempo a estudiar. La optimización puede efectuarse con respecto a varios objetivos cuantificables del sistema y los sectores de demanda pueden oscilar desde altamente agregados hasta muy desagregados, dependiendo de la cualidad de la información disponible.

El modelo permite un máximo de 16 períodos iguales de tiempo, siendo la longitud de cada uno de los intervalos opcional. Sin embargo,

en la mayoría de las aplicaciones se ha usado el modelo MARKAL con 9 períodos de tiempo, de 5 años cada intervalo yendo desde 1980 hasta 2025. El primer período de tiempo, que cubre cinco años, iría desde mediados de 1977 hasta mediados de 1982.

MARKAL representa un significativo avance en los modelos de programación lineal. Algunas de sus principales características son:

- La representación más detallada de las paradas programadas e imprevistas en las centrales eléctricas.

- Un completo ciclo del combustible nuclear antes, en y después de los períodos de construcción. Contemplando también la formación de stock de material nuclear.

- Se ha representado explícitamente una representación del refinado de petróleo con un amplio margen de posibles productos mixtos. MARKAL selecciona la mezcla óptima de fracciones del petróleo, tecnológicamente factibles que satisfacen las demandas de productos energéticos sobre todo el período de tiempo.

- La nueva caracterización del sistema hidroeléctrico y de bombeo refleja las variaciones temporales en disponibilidad hidráulica; ej. energía hidráulica puede no ser, y de hecho no es, disponible durante el invierno, mientras que alguna electricidad puede ser disponible para exportación durante el verano.

- El modelo MARKAL también proporciona una detallada representación del sector eléctrico en el cual la demanda de electricidad está distribuida entre seis bloques estacionales y diarios. Además, existe la posibilidad de restringir algunas de las centrales eléctricas a funcionar tan sólo en la curva de carga, al mismo tiempo que recursos eléctricos inseguros (viento, mareas, solar, etc.) se pueden excluir como contribuyentes en la satisfacción de las demandas pico.

- Las tecnologías de conversión son retiradas automáticamente de servicio al final de su vida técnica especificada.

- También se han representado sistemas de calefacción urbana y calor y electricidad de cogeneración.

- La base de datos requerida es generada directamente por un sistema de dirección de base de datos (System 2000) y por lo tanto proporciona una preparación automática de los inputs del MARKAL.

El modelo MARKAL ha sido utilizado para analizar los sistemas energéticos de 15 países y de la Comunidad Económica Europea, como colectivo. Cada uno de los 15 países ha ejecutado 16 escenarios tipo, los cuales reflejan diferentes combinaciones de supuestos sobre opciones de política energética y restricciones globales. Como consecuencia

el modelo MARKAL se ha convertido en un modelo standar de amplia aplicación internacional.

## 9. Comparaciones entre el modelo TESOM y MARKAL

Ambos modelos pueden ser usados para analizar:

a) los efectos de nuevas tecnologías en la satisfacción de futuras demandas de servicios energéticos;

b) la relativa competitividad de nuevas tecnologías, para proporcionar un guía en la asignación de recursos en programas de Investigación y Desarrollo. Las soluciones técnicas de problemas de programación lineal están específicamente diseñadas para hacer análisis paramétricos tanto de costes ingenieriles como de parámetros de disponibilidad;

c) la sensibilidad de la evolución del sistema energético a diferentes fechas de disponibilidad de tecnologías, su máxima capacidad de crecimiento permitida y los costes de las mismas;

d) la distribución en el tiempo de las necesidades de inversión y sus impactos en el sistema económico;

e) los efectos a largo plazo de políticas de conservación en los sistemas de distribución de oferta y demanda de energía;

f) valoraciones tecnológicas con respecto a criterios jerárquicos de prioridades. Tres criterios significativos pueden ser: seguridad, coste y "preocupaciones sociales". Un criterio a utilizar para maximizar la seguridad es minimizar importaciones; para el objetivo coste es minimizar el valor actualizado descontado del sistema energético; "preocupaciones sociales" puede significar un rechazo a (a) consumo de carbón, (b) uso de sistemas energéticos altamente centralizados, (c) excesivo y o abusivo uso de la tierra, y (d) exposición a la radioactividad. Algunas de las variables sugeridas son: (a) CO<sub>2</sub>, (b) radioactividad, (c) un indicador ponderado de afluentes atmosféricos seleccionados, y (d) emisiones de calor por el uso de combustibles no renovables;

g) el trade-off entre diferentes objetivos. Estos modelos de programación lineal proporcionan una estructura adecuada para analizar, por ejemplo, el trade-off entre seguridad y costes. Pudiéndose también evaluar programas de Investigación y Desarrollo respecto a objetivos concretos.

Aunque ambos modelos pueden ser utilizados para todo lo anteriormente enumerado, TESOM es más un instrumento de simulación que el modelo MARKAL. Este último se podría considerar como un modelo

normativo el cual a lo mejor es más apropiado para estrategias de planificación global. MARKAL puede ser preferible para identificar la "mejor" estratégica a largo plazo bajo diversos criterios cuantificables. Sin embargo, esta óptima estrategia no es probable que sea alcanzable, debido a que nunca se dispone de información perfecta. El valor de una solución a partir del MARKAL es el conocimiento de cual es lo mejor, lo que no necesariamente significa que sea una solución viable.

Existen algunas importantes diferencias entre MARKAL y TESOM que tienen que ser tenidas en cuenta para obtener la máxima utilidad de cada uno de los modelos. Las principales de dichas diferencias son:

- tratamiento de la "información" sobre el futuro para la toma de decisiones,
- tratamiento del coste en la función objetivo,
- tratamiento del ciclo del combustibles nuclear y de la energía hidráulica,
- tamaño y dificultad en la resolución del problema,
- posibilidad de integrar en la estructura del modelo feed-backs económicos,
- incorporación de la dinámica para la penetración de mercado de las tecnologías energéticas.

### *Tratamiento de la información*

La forma como TESOM y MARKAL tratan la información acerca del pasado, presente y futuro, es una de las diferencias más importantes entre ambos modelos. Refleja dos puntos de vista distintos acerca del proceso seguido por los consumidores al tomar una decisión.

Como ya se ha dicho anteriormente, la formulación matemática del MARKAL supone el uso de toda la información respecto al pasado, el presente y el futuro en el proceso de decisión. Es decir, la solución óptima del modelo se obtiene después de considerar la demanda de servicios energéticos durante todo el horizonte temporal, la duración y magnitud de cualquier perturbación energética, las fechas de disponibilidad comercial de todas las tecnologías, las curvas de coste a largo plazo de los recursos energéticos, etc... Esta forma de resolver el problema tiene como consecuencia que cualquier desequilibrio o incremento brusco en el precio de la energía es previsto, y por consiguiente conlleva a una alteración anticipada de los comportamientos en el uso de la energía.

De forma diferente, en la formulación matemática del TESOM se requiere para el proceso de toma de decisión, información concernien-

te al pasado, presente y expectativas acerca de los futuros precios de los recursos energéticos. Nada acerca del futuro se supone conocido con antelación. En la solución óptima que ofrece el modelo para cada período de tiempo del horizonte temporal estudiado, se han extrapolado los futuros precios de la energía a partir de las tendencias de los mismos hasta dicho período.

### *Tratamiento del coste en la función objetivo*

Aunque en ambos modelos los componentes de la función coste son básicamente los mismos, la forma de cálculo es bastante diferente.

En MARKAL la función objetivo coste, llamada "precio", es el valor "coste" sobre todo el período de tiempo descontado al presente. Es decir, el "coste" es la suma del coste anual del sistema descontado al presente, más los costes de inversión, menos el valor residual de las inversiones al final del horizonte temporal estudiado.

Los costes de inversión son contabilizados enteramente en el momento de entrada en funcionamiento de una unidad dada. Los costes de combustible se contabilizan en el año central del período de tiempo en el cual el combustible es usado. Todos los costes son descontados a mediados de 1978, y sumados para obtener el valor presente del total del sistema durante todo el período estudiado. La tasa de descuento debe ser especificada.

En TESOM se asume que la mayor parte del capital de cualquier inversión provendrá del crédito y será reintegrada con pagos iguales durante toda la vida económica de la inversión. En concreto, si  $I$  es la inversión y  $i$  es el tipo de interés establecido, entonces pagos anuales iguales de  $P$  se requerirán durante la vida económica  $L$ , de la inversión, ej.:

$$P = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-L}} * I$$

La cantidad anual  $P$  se contabiliza, como ya se ha dicho, durante toda la vida económica de la inversión, sin tener en cuenta si la utilización de dicha tecnología es considerada óptima por el sistema. En TESOM todos los costes están dados en dólares constantes de 1975.

La función objetivo coste es normalmente el coste anualizado de la inversión de capital, más los costes anuales de combustible y los costes, también anuales, de operación y mantenimiento.

*Tratamiento del ciclo del combustible nuclear y de la energía hidráulica*

El modelo MARKAL incorpora una representación del ciclo nuclear bastante detallada, mientras que en el modelo TESOM este aspecto está muy simplificado. Para la energía hidráulica, está explícitamente modelada la posibilidad de paradas en la producción hidroeléctrica debidas a factores estacionales; sin embargo las variaciones de disponibilidad estacional de energía sólo se pueden contemplar a través de la reducción del factor de disponibilidad.

*Tamaño y dificultad en la resolución del problema*

MARKAL tiene aproximadamente 3.500 restricciones y 4.000 variables. Los resultados se pueden obtener un día después de la entrada del problema en el ordenador. El manejo de los datos se organiza a través de un sistema de base de datos comercial, y existe un sistema de verificación de datos para reducir los errores tipográficos en los datos input.

TESOM empieza aproximadamente con 350 restricciones y 400 variables y puede crecer hasta aproximadamente 800 restricciones y 900 variables en el año 2025. También en este caso los resultados se pueden obtener un día después de someter el problema. El manejo de los datos se hace directamente a través de la edición de ficheros input, y no se ha desarrollado ningún método de verificación tipográfica de los datos.

*Posibilidad de integrar en la estructura del modelo feed-backs económicos*

Mientras que el modelo MARKAL no ha sido nunca acoplado a un modelo de crecimiento macro-económico, el modelo TESOM normalmente se utiliza con el modelo macro-económico Long-Term Inter-Industry Transactions Model (LITM) de Dale Jorgenson Associates; el manejo conjunto de ambos modelos está semi-automatizado.

*Tratamiento de los mecanismos de penetración de mercado de las tecnologías energéticas*

En MARKAL los inputs para establecer la penetración de mercado de cualquier tecnología son simplemente los límites máximos de capaci-



dad que pueden entrar en funcionamiento en un período determinado. Pequeñas variaciones de costes pueden provocar cambios bruscos en las decisiones de inversión.

En TESOM la penetración de mercado de todas las tecnologías es un proceso dinámico. Los niveles optimísticos de penetración de mercado de cada tecnología para cada período son datos inputs pero que se ven ajustados dinámicamente, basándose en el comportamiento que dicha tecnología ha presentado en soluciones para períodos previos. El algoritmo que se utiliza para suavizar este "todo o nada" de los modelos de programación lineal, ha sido explicado anteriormente.\*

#### BIBLIOGRAFIA

- ABILOK, H and FISHBONE, L.G.: *User's Guide for Markal*, B.N.L.-27.075, December, 1979.
- BELLER, M. (ed.): *Suourcebook for Energy Assessment*, B.N.L.-504.883, December, 1975.
- BHAGAT, N.; BELLER, M.; HERMELEE, A.; WAGNER, J. and LAMONTAGNE, J.: *Evaluation of Technological Data in the DFI and PIES models*, B.N.I.-50.949, April, 1979.
- CARHART, S.; MULHERKAR, S. and SANBORN, Y.: *The Brookhaven Building Energy Conservation Optimization Model*, B.N.L.-50.828, January, 1978.
- CHERNIAVSKY, E.A.; JUANG, L.L.; KYDES, A.S. and RABINOWITZ, J.: *Brookhaven Energy System Optimization Model - Methodology and Documentation* (Version 2.1.), Draft, B.N.L., April, 1978.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Energy Policies and Programmes of IEA Countries*, 1978 Review, Paris, 1979.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, *Anuario Estadístico de España 1979*, Madrid, 1980.
- KERNFORSHUNGSANLAGE, *Energy Technology Data Handbook*, Julich, Germany, January, 1980.
- KYDES, A.S.: *A comparative review of the Time-Stepped Energy Optimization Model (TESOM) and the I.E.A. Market Allocation Model (MARKAL)*, Draft, B.N.L., April, 1980.
- KYDES, A.S.: *The Brookhaven Energy System Optimization Model its variants and uses*, B.N.L.-50.873, May, 1978.

\* Dada la longitud de este trabajo se ha creído conveniente dividirlo en dos partes. La aplicación del modelo Time-Stepped Energy System Optimization Model (TESOM) al sistema energético español se presentara en otro artículo de esta revista.

- KYDES, A.S.; CHERNIAVSKY, E.A. and MARCUSE, W.: *The Brookhaven Time-Stepped Energy System Optimization Model*, B.N.L.-24.223, ORSA-TIMS, November, 1978.
- KYDES, A.S. and RABINOWITZ, J.: *The Time-Stepped Energy System Optimization Model (TESOM), overview and special features*, B.N.L.-26.456, August, 1979.
- MARCUSE, W.; BODIN, L.; CHERNIAVSKY, E.A. and SANBORN, Y.: *A Dynamic Time Dependent Model for the Analysis of Alternative Energy Policies, Operational Research '75*, K.B. HALEY, Ed., North Holland Publishing Company, 1976.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA, Comisaria de la Energía y Recursos Minerales, *Coyuntura Energética*, publicación mensual.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA, *Plan Energético Nacional 1978-1987*, Madrid, 1979.
- MINISTERIO DE COMERCIO Y TURISMO, Secretaría General Técnica, *Balanza de Pagos de España 1977*, Junio 1978.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, *Energy Balances of OECD Countries*, Paris, 1979.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, *Energy Statistics 1975-1977*, París, 1979.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, *Oil Statistics 1977*, París, 1979.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, *World Energy Outlook*, París, 1979.
- THE PETROLEUM PUBLISHING, Co., *International Petroleum Encyclopedia 1977, 1978, 1979*, United States.
- REISMAN, A. and MALONE, R.: *Less Developed Countries Energy System Network Simulator LDS-ESNS*, B.N.L.-50.836, April, 1978.
- SAILOR, V.L. Ed.: *Technology Review Report, IEA Systems Analysis Project*, B.N.L.-27.074, December 1979.
- UNITED NATIONS, *Yearbook of Industrial Statistics*, 1977 Edition, Volume I-II, New York, 1979.
- UNION NACIONAL ELECTRICA, S.A.: *Memoria del año 1977*, Madrid, 1978.